ОБЗОРЫ

УДК 621.735.001.2

Ю.Н. РЕЗНИКОВ, А.В. ВОВЧЕНКО

РАСЧЁТ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ОБЪЁМНОЙ ШТАМПОВКИ

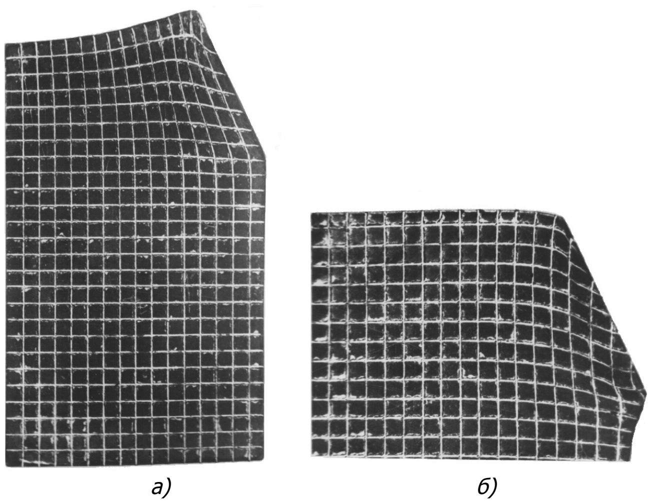
Представлен обзор методов расчёта и оптимизации процессов объёмной штамповки. Рассмотрены схемы прямого и обратного математического моделирования формоизменения металла при штамповке, методы реализации расчётов. На конкретных примерах показаны принципы и методы расчёта оптимальных заготовок для поковок, изготавливаемых объёмной штамповкой.
Ключевые слова: *прямое и обратное моделирование, оптимизация процессов объёмной штамповки, МГЭ (BEM), МКЭ (FEM).*

Введение. Совершенствование технологических процессов объёмной штамповки в течение длительного периода времени базировалось главным образом на применении статистических алгоритмов [1-3]. К этому же периоду времени относится развитие вариационных методов в теории обработки металлов давлением (ОМД), положивших начало широкому применению расчётов, основанных на анализе течения металла при штамповке [4]. Оба направления сыграли и играют важнейшую роль в развитии теории и практики объёмной штамповки (ОШ) и технологии кузнечно-штамповочного производства (КШП) в целом. Однако, поскольку в настоящем обзоре рассматриваются работы, основанные на анализе течения металла в процессах ОШ, отметим, что интенсивное развитие этого направления началось сравнительно недавно, с применением в расчётах численных методов, в первую очередь метода конечных элементов (МКЭ) [5] и реализации расчётов на ЭВМ.

В изложенном ниже обзоре рассмотрены некоторые принципиальные вопросы современного состояния и развития расчётов и оптимизации в технологии ОШ, входящие в круг научных интересов авторов.

Прямые и обратные задачи расчёта формоизменения металла в процессах объёмной штамповки. Одной из главных задач расчётов формоизменения металла в процессах объёмной штамповки является согласование формы и размеров заготовок и полуфабрикатов, характера течения металла в исследуемом процессе с формой и размерами чистового ручья.

Даже в случае штамповки поковок простой формы следует рассматривать возможные разновидности течения металла, зависящие прежде всего от геометрической формы ручьёв и контактных условий (рис.1).



а) *б)*

Рис.1. Экспериментально наблюдаемые картины течения металла при заполнении полости однощелевого штампа (по данным работы [6]): а – течение выпучиванием вверх; б – течение выпучиванием вбок

Моделированию задач получения одних и тех же изделий из заготовок различной формы уделяется внимание и в зарубежных работах последнего времени. Так, например, в работе [7] рассматривается процесс осадки заготовок с различной формой боковой поверхности. Цель исследований состояла в том, чтобы получить поковку, форма образующей боковой поверхности которой наиболее близка к вертикали (рис.2).

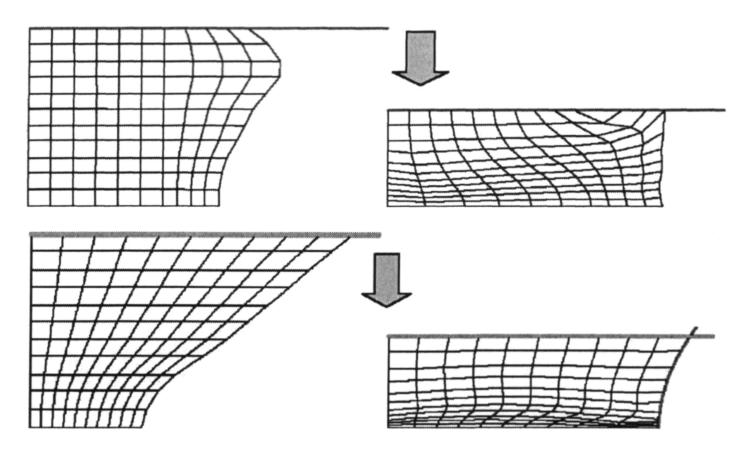


Рис.2. Схема осадки заготовок с различной формой боковой поверхности

После того как установлен характер течения металла, необходимо согласовать размеры заготовок, заготовительных переходов и готовой поковки, поскольку, по крайней мере, с позиций расхода металла и энергозатрат, конечные результаты процесса могут оцениваться либо как вполне приемлемые (рис.3,*б*), либо как неудовлетворительные (рис.3, *а* и *в*).

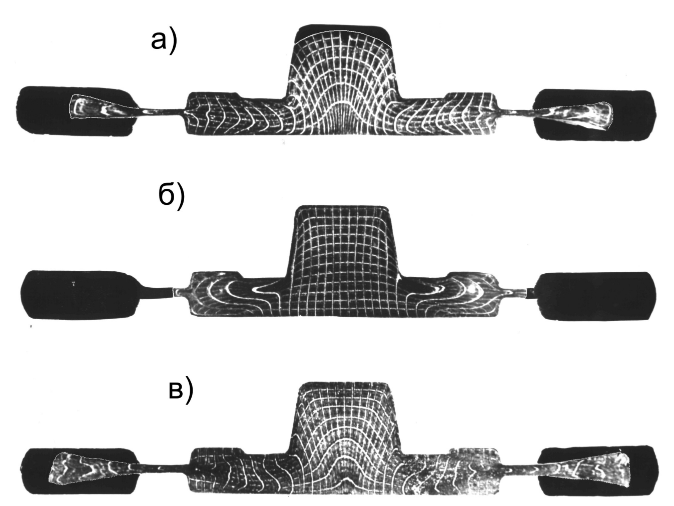


Рис.3. Различное заполнение полости штампа в зависимости от согласования размеров заготовки, течения металла и размеров поковки: *а* - раннее вытекание металла в облой при незаполнении полости чистового ручья; *б* - удовлетворительное согласование – металл заполняет лишь необходимый участок облойной канавки; *в* - наличие в заготовке избытка металла, вытекающего в облой

Достичь приемлемых по требуемым параметрам результатов вполне возможно, выполняя прямое моделирование формоизменения – от исходной заготовки к поковке. Такая практика в КШП широко распространена и в настоящее время. Например, в работе [8] для получения бездефектной поковки типа «шестерня» применено прямое моделирование, состоящее в расчёте формоизменения различных исходных заготовок (в готовую поковку), из которых выбрана та, которая обеспечила требуемое заполнение чистового ручья.

Подобный метод определения рациональной формы заготовок описан довольно давно в учебнике [9]. Экспериментально подбирались форма и размеры заготовок, заполняющих полость чистового ручья в виде шара при условии, что полюсный и диаметральный потоки металла достигают ручья одновременно. Позднее, во втором издании учебника [9], было установлено, что для получения поковки типа «шестерня» с минимальным облоем необходимо применять заготовку с вогнутостью в средней её части. Приведенные примеры свидетельствуют о принципиальной возможности определения рациональных формы и размеров заготовок прямым моделированием: физическим или математическим. Явным недостатком такого подхода является необходимость итерационных действий, часто достаточно трудоёмких, и поэтому в различных отраслях науки и техники, в том числе и в ОМД, нашёл применение метод, базирующийся на решении обратных задач. В настоящее время известна принципиальная, по нашему мнению, характеристика этих задач, состоящая в том, что «…как задачи связанные с обращением причинно-следственной связи, обратные задачи отражают общую проблему фундаментальных научных исследований: по некоторым характеристикам наблюдаемых явлений установить их причины …» [10, с.12-13].

Применительно к процессам объёмной штамповки методика расчётов, основанных на решении обратных задач формоизменения, впервые предложена и разработана в работах [11] и [12].

Сущность подхода следует из рис.4, где рассмотрены кинематически возможные поля скоростей (КВПС) для последней стадии штамповки, на которой оформляется готовая поковка. Эта стадия принята в качестве первой расчётной, а движение штампа – совершаемое в направлении, обратном протеканию естественного процесса штамповки. Основная идея расчёта, предложенного в работе [12], состояла в том, что он был основан на обращении движения деформирования. Применение такой терминологии в давней уже работе [12] вполне согласуется с процитированным выше определением обратных задач в сравнительно недавней фундаментальной монографии известных учёных [10].

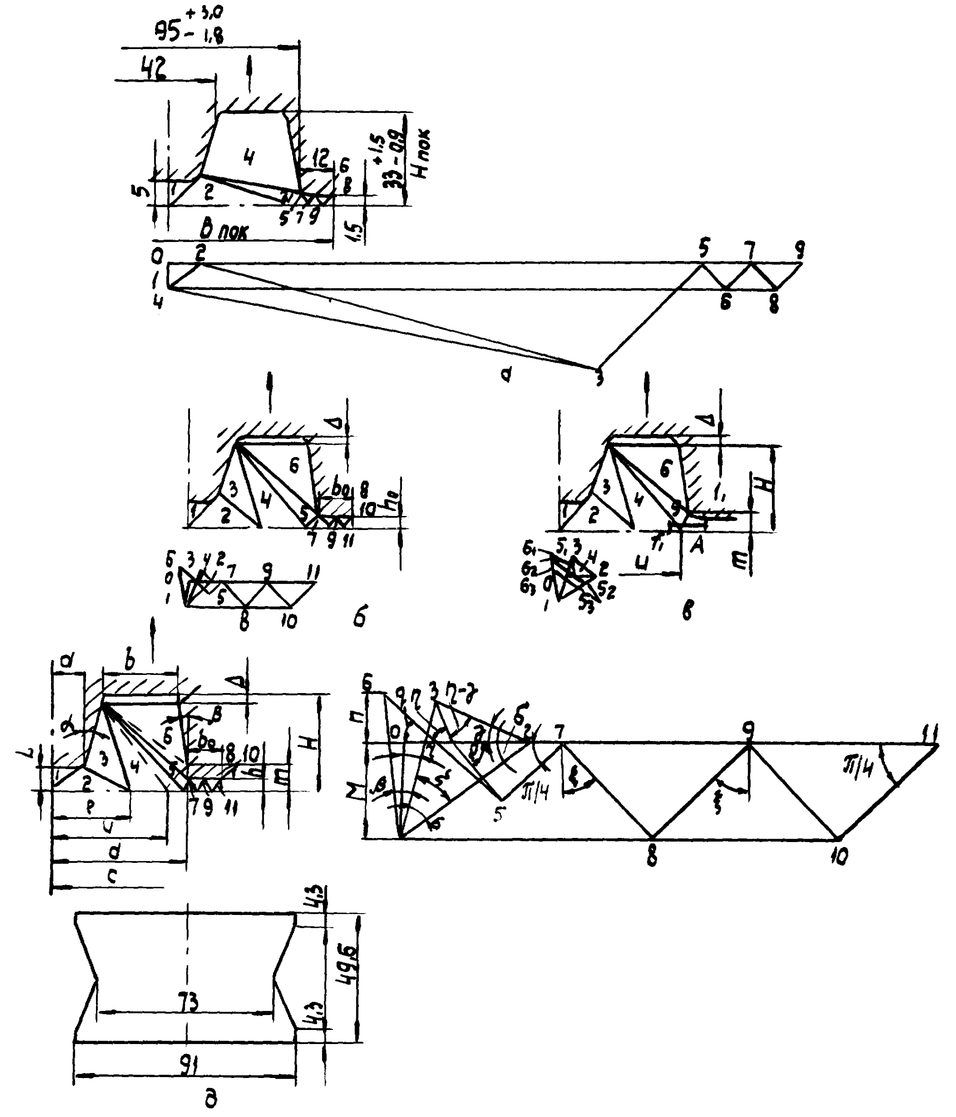


Рис.4. КВПС, применённые для расчёта заготовки, начиная от готовой поковки в направлении, обратном протеканию процесса штамповки: *а* – на последней стадии штамповки при заполнении металлом полости штампа; *б* – на последней стадии штамповки при сохранении зазора между металлом и штампом до конца процесса; *в* – на стадии штамповки с отсутствием облоя; *г* – для конечной стадии штамповки поковки с упрощённой конфигурацией; *д* – рассчитанная заготовка

Для расчёта формы и размеров заготовки было принято, что скорости перемещения металла в отдельных зонах поковки равны по величине, но противоположны по направлению по отношению к скоростям этих же зон в процессе штамповки, а в целом процесс рассматривается в направлении, обратном его естественному протеканию. По размерам готовой поковки и скоростям течения металла на последней стадии штамповки рассчитываются размеры заготовки на предпоследней – 2-й расчётной – стадии процесса и далее аналогичным образом на всех последующих, пока, в конечном счёте, не будет получена заготовка, соответствующая заданной поковке и принятым при расчёте условиям. Влияние этих условий на качество поковки видно из КВПС на рис 4 (*а,б,в*).

Хорошо известно, что увеличение скорости вытекания металла из штампа приводит к ухудшению структуры и качества поковок, вплоть до расслоения их в плоскости облойного мостика [13].

В первых работах по определению параметров процессов ОМД на основе решения обратных задач формоизменения достигалась определённая технологическая цель, состоящая в определении формы и размеров рациональных заготовок, позволяющих получать готовые изделия с небольшим отходом или вовсе без него. Таковы упомянутые выше задачи о подборе заготовок для поковки в форме шара [9, с.345] и для изготовления поковки типа «шестерня», когда наличие вогнутости на боковой поверхности заготовки обеспечило, по терминологии автора, «полезный» объём заусенца, располагавшегося только в мостике заусенечной канавки и создающего подпор, требуемый для заполнения полости чистового ручья.

Аналогичная технологическая цель – экономия металла – достигается при расчёте заготовки по схеме, показаной на рис.4, а также при профилировании поверхности слитка на основе решения обратной задачи процесса прокатки [14]. И с такой позиции содержащееся в работе [14] определение обратной задачи ОМД вполне оправданно: «…обратная задача теории пластичности – восстановление начального профиля по заданному конечному …» [14, с.31]. Однако практика численной реализации схемы обратного расчёта в процессах ОШ показала, что «…представление об обращении причинно-следственной связи в постановке обратных задач расширяет их класс …» [11, с.12-13], в частности, на задачи оптимизационные, что предметно рассмотрено ниже.

Совершенствование технологических процессов объёмной штамповки на базе расчёта и анализа течения металла успешно выполняется в настоящее время многими исследователями путём решения как прямых задач формоизменения, из которых упомянем работы [15-17], так и обратных, например [18-20].

Развиваются и численные схемы решения обратных задач. Например, в работах [21, 22] развита и обоснована реверсивная схема решения обратной задачи. Согласно этой схеме, процесс штамповки с самого начала рассматривается в обратном направлении – от состояния готовой поковки. Расчёт в обратном (реверсивном) направлении реализуется непосредственно до состояния заготовки, приемлемой, по мнению технолога, геометрической формы. При этом действия, связанные с процедурой периодического определения и обращения движения деформирования на промежуточных стадиях расчёта не производятся, а необходимое и обязательное решение прямой задачи, в частности для оценки адекватности данных, полученных обратным расчётом, выполняется после получения готовой заготовки.

На примере решения задачи об осадке заготовки показано, что применение реверсивной схемы решения обратной задачи позволяет сократить длительность цикла расчётов на величину от 40 до 60% (в зависимости от величины дискретизации процесса) без потери точности (искомые параметры совпадают до 4-го знака после запятой). Возникает такая возможность за счёт простой программной организации непосредственно схемы реверсирования в обратных расчётах формоизменения. Обоснованность применения такой схемы в решении обратных задач приводится в работе [22].

Подчеркнём, что расчёты формоизменения в процессах ОШ, выполненные по прямой и обратной схемам, не исключают, а дополняют друг друга, что отмечалось ещё в работе [12]. При этом каждая из схем может быть реализована с применением любого из современных методов расчёта процессов ОМД.

Методы расчёта процессов объёмной штамповки. Для расчёта течения металла и анализа на этой основе возможностей совершенствования технологических процессов ОШ применялись и применяются практически все известные в теории пластичности и ОМД расчётные методы. Так, многие практические результаты получены путём применения расчётов, основанных на построении полей линий скольжения [23]; решение ряда инженерных задач стало возможным благодаря развитию приближённого энергетического метода (метода верхней оценки (МВО)) [24,25]; важные результаты в совершенствовании технологии штамповки ответственных ребристых деталей получены в работах [26,27] благодаря использованию теории течения пластического вещества по поверхностям [28]; из многих работ по применению в расчётах процессов ОМД численного метода конечных разностей (МКР) отметим прогнозирование и устранение образования зажимов при формовке колёсных заготовок [29], обобщённую численную

математическую модель расчёта осесимметричной пластической деформации [30] и математическое моделирование процесса получения непрерывно-литой деформированной заготовки на литейно-ковочном модуле [31].

Численный метод конечных элементов (МКЭ) в настоящее время наиболее часто применяется в расчётах процессов ОШ. Из работ по применению МКЭ в расчётах процессов ОМД отметим [32-35], наиболее близкие к основной проблеме, рассматриваемой в обзоре: в этих работах решаются практические технологические задачи на базе прямого моделирования процессов ОШ.

Переоценить важность работ по применению МКЭ в ОМД невозмож-

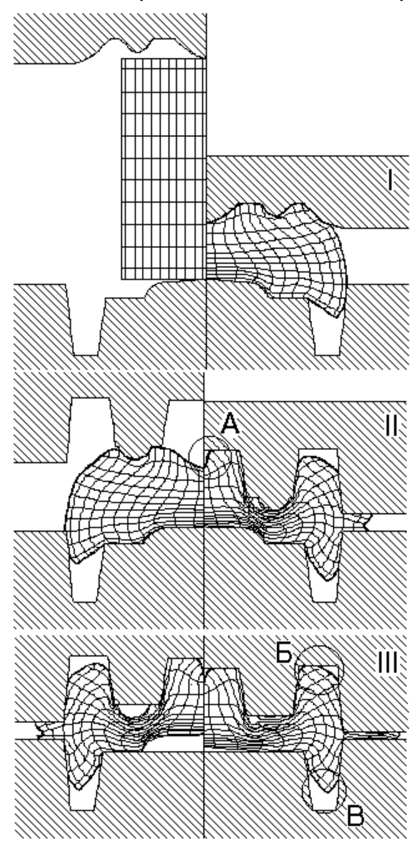


Рис.5. Данные математического моделирования (с помощью МКЭ) формоизменения процесса штамповки в три перехода (I–III)

но. Тем не менее, поскольку в наших расчётах моделирование процесса ОШ выполнено чаще всего численным методом граничных элементов (МГЭ), отметим следующее. Как всякий численный и любой другой расчетный метод, МКЭ не лишен недостатков. Некоторые погрешности расчётов, выполненных МКЭ по сравнению с МГЭ, рассмотрены в работе [36]. Из наших расчётов [37] следует, что в некоторых случаях данные, полученные МКЭ, не являются адекватными реальным.

Так, на рис. 5 показано, что конечно-элементным расчётом прогно-

зируются утяжина в средней части поковки (А) и незаполнение периферийных полостей (Б и В). Расчёт, выполненный с помощью метода граничных элементов (МГЭ), а главное – физическое моделирование, не подтверждают такого характера течения металла при заполнении чистового ручья.

Из приведенного на рис. 5 факта ни в коем случае не следует вывод о том, что МКЭ нельзя применять для моделирования процесса штамповки. По нашему мнению, речь должна идти о возможностях того варианта МКЭ, который реализуется имеющейся программой Q-Form. Известно, что «…по способу исполнения и формулировки основных уравнений МКЭ … различают четыре основных вида МКЭ: прямой, вариационный, резидуума и энергетического баланса …» [38, с.9]. В имеющемся конечно-элементном пакете реализован прямой метод матриц жёсткости, который рекомендован для решения «…относительно простых проблем …» [38, с.9], то есть применительно к процессу ОШ для тех поковок, деформация при изготовлении которых характеризуется более простым путём деформирования, чем для поковки, показанной на рис.5.

В подтверждении сказанного приведём данные работы [39], в которой для улучшения схемы расчётов, соответствующей прямому методу матриц жёсткостей, рекомендуется «…сделать метод вариационным подходом …» (с.169).

Приведенное высказывание свидетельствует о недостатках схемы прямого метода матриц жёсткости в МКЭ. Предложенный автором работы [39] выход из этой ситуации – переход к вариационной схеме МКЭ – к той проблеме, которая рассматривается в указанной работе, видимо, скорее всего, имеет смысл. Применительно же к расчётам процессов ОШ и других процессов ОМД требуется, по нашему мнению, иное решение, что связано с особенностями функционалов этих процессов [40].

Таким образом, погрешности расчётов, выполняемых МКЭ, вполне могут быть связаны с конкретным вариантом реализуемого программно алгоритма.

Это утверждение в полной мере относится к любому численному методу, в том числе и к МГЭ. Подтвердим сказанное. Гранично-элементные расчёты для нелинейных сред, предполагают построение схем, реализующих различные итерационные алгоритмы [41-44]. Рассматривая общий подход с позиций принятого в методе упругих решений, следует иметь в виду работу [45], в которой обосновывается сходимость метода «…без каких-либо предположений о малости параметров, определяющих задачу».

Для практического инженерного использования метода важна не только его принципиальная приемлемость, в частности сходимость, но и качество конкретного рекомендуемого для расчётов алгоритма. Поскольку

наиболее известным алгоритмом метода упругих решений является алгоритм, основанный на введении модифицированных объёмных сил и усилий на поверхности деформируемого тела, именно в соответствии с этим алгоритмом и были выполнены первые работы по применению МГЭ к задачам ОМД [46-48]. Расширение области применения МГЭ в технических расчётах показало, что для этого алгоритма «…сходимость и точность решения не вполне удовлетворительны» [41, с.343].

Для улучшения качества решения в дальнейших работах по применению МГЭ был использован алгоритм переменной жёсткости и не метод потенциала, ныне известный как непрямой метод граничных элементов (НМГЭ), а прямой метод МГЭ, в котором неизвестные, входящие в уравнения и алгоритм – физически ясные величины – напряжения и скорости перемещения.

Таким образом, приведенные на рис.5 расчётные данные отражают не возможности МКЭ в моделировании формоизменения в расчётах процессов ОШ, а качество конкретной расчётной программы.

Тем не менее, поскольку фактически между исследователями, использующими разные расчётные численные методы, существует если не противостояние, то соперничество, а в наших исследованиях использован МГЭ, пока не такой популярный, как МКЭ, отметим следующее.

Не умоляя значения МКЭ, обращаем внимание на утверждение о том, что «…возможности применения метода конечных элементов к широкому классу задач преувеличены. Последнее, без сомнения, обусловлено энергичной деятельностью исследователей, занимающихся конечными элементами, а также тем обстоятельством, что повышение интереса к методу конечных элементов совпало по времени с созданием первого поколения мощных ЭВМ» [43, с.7]. Имея в виду расчёты процессов ОМД, отметим обстоятельства, свидетельствующие о целесообразности применения МГЭ. Отрадно, что первое следует из работы исследователей, впервые применивших граничные интегральные уравнения для исследования упругопластических течений [49, с.96]: «…для массивных трёхмерных тел, особенно когда требуется высокая точность решения, *различные видоизменения метода конечных элементов являются далеко не оптимальными.* Задачи, решаемые методами, которые дискретизируют весь объём, приводят к трудно выполнимым требованиям относительно размера ячейки, а также машинного времени». Стремительное развитие мощности ЭВМ, безусловно, вносит коррективы в высказанное положение, прямо относящееся к целесообразности применения МГЭ для расчёта ковки крупных поковок. Существенным также представляется редукция – уменьшение размерности задачи, характерная для МГЭ, особенно в связи со сложностями решения оптимизацион-

ных задач, о чём подробнее сказано в следующем разделе. Здесь же отметим, что между МКЭ и МГЭ ни в задачах моделирования процессов ОШ, ни в каких других нет и не может быть противостояния. Эти методы могут и должны дополнять друг друга, поскольку во всех отраслях техники «…не существует самого лучшего метода для решения всех задач» [50, с.154].

Одним из подтверждений сказанного может служить эффективность применения МГЭ для моделирования процессов ОМД, показанная в работах [51-55]. В частности, следуя работе [55], рассмотрим кратко возможность уменьшения длительности стадии доштамповки в процессе штамповки, что неизбежно приводит к снижению металло- и энергозатрат.

Процесс штамповки поковки «стойка» (рис.6, а) по заводским условиям осуществлялся в один технологический переход. Качество процесса штамповки поковки, согласно проведенным исследованиям, при ($V_{пок}=V_{заг}=const$) зависит от диаметра исходной цилиндрической заготовки (*d*,мм).

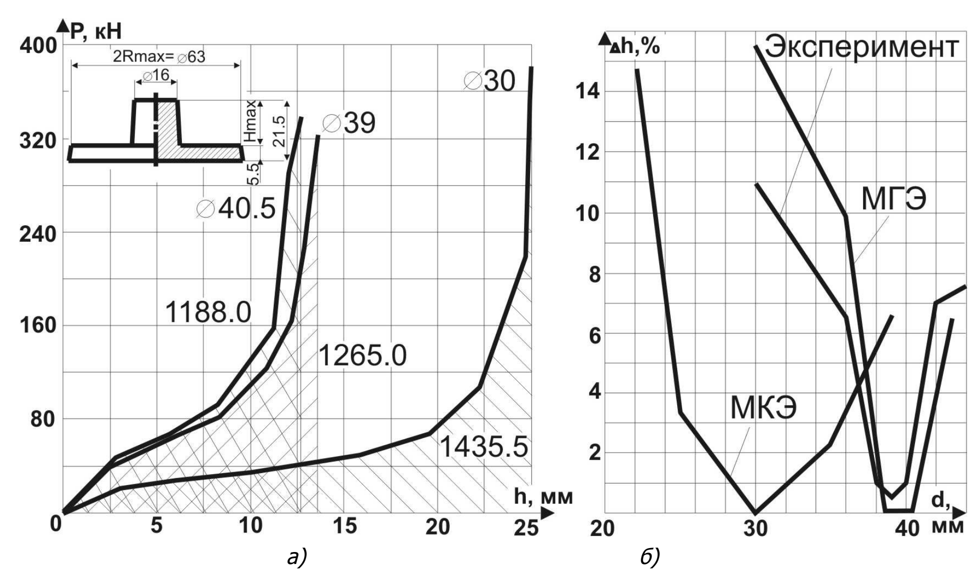


Рис.6. Зависимости, иллюстрирующие процесс штамповки поковки «стойка»: *а* - экспериментальные силовые характеристики процесса штамповки из заготовок различного диаметра; *б* - влияние диаметра заготовки на параметр Δh, полученное различными методами

Рациональный процесс штамповки поковки «стойка» характеризуется одновременным заполнением полости ступицы и полости фланца поковки совместно с мостовой полостью облойной канавки (например, см. рис.3,*б*). В этом случае в процессе штамповки исключается стадия доштамповки, сопровождающаяся, как известно, однонаправленным течением металла и завышенным технологическим усилием. Применение диаметра заготовки меньше рационального приводит в процессе штамповки к быстрому заполнению полости ступицы и дальнейшему однонаправленному движению металла в полости фланца. Завышенное значение этой величины приводит к первоначальному заполнению полости фланца с мостовой полостью облойной канавки и незаполнению полости ступицы с вытеснением соответствующего объёма металла в магазинную часть облойной канавки (например, см. рис.3,*а*).

Для оценки процесса формоизменения при штамповке данной поковки было предложено выражение, характеризующее одновременно оба варианта заполнения ручья штампа и определяющее значение той части относительного деформирующего хода инструмента Δh, которая сопровождается течением материала в одном направлении:

$$\Delta h = \left| \left(\frac{h}{h_{\max}} \right)_{фланца} - \left(\frac{h}{h_{\max}} \right)_{ступицы} \right|, \qquad (1)$$

где $\left(\frac{h}{h_{\max}} \right)_{фланца}$, $\left(\frac{h}{h_{\max}} \right)_{ступицы}$ – относительные величины рабочего хода подвижной половины штампа (*h*, мм) при заполнении фланцевой и ступичной полостей ручья, соответственно.

Таким образом, рациональный диаметр цилиндрической заготовки должен быть определён минимальным значением величины Δh.

Полученные в результате моделирования формоизменения различными численными методами данные имеют отличия. На рис. 6,*б* представлены результаты формоизменения из заготовок разных диаметров в процессе штамповки поковки по данным эксперимента и расчётам, выполненным МКЭ и МГЭ.

Имеющиеся данные (см. рис. 6,*б*) показывают, что диаметр рациональной заготовки, полученной МГЭ, лежит в диапазоне 38,5-40,5 мм, что объясняется результатом обратного расчёта: полученная заготовка имела форму усечённого конуса $\varnothing 38{,}5 \times \varnothing 42{,}5 \times 16$ мм с незначительной бочкообразностью боковой поверхности. Остальные переломные точки графика (см. рис. 6,*б*), полученного МГЭ, определены прямым расчётным подходом. Этот же подход позволяет получить величину *d* более точно в рамках упомянутого выше диапазона значений, но требует неоднократного (итерационного) решения прямой задачи. Экспериментальная зависимость $\Delta h = f(d)$ достаточно близка к результатам гранично-элементного расчёта: рациональная заготовка имеет ∅39мм. При этом данные прямого конечно-элементного расчёта (см. рис.6,*б*) показывают, что ещё на заготовке ∅30 мм (заготовка, используемая в заводской технологии) присутствует двунаправленное заполнение ручья штампа.

Экспериментальные силовые характеристики процесса штамповки позволяют оценить процесс по параметрам максимального потребного усилия (Р,кН) и работе деформирования (А, кН×мм) в сравнении с технологией традиционной заводской штамповки поковки «стойка» (см. рис.6,*а*).

Рассмотренная в настоящем разделе методика расчёта формы и размеров заготовок и заготовительных ручьёв решает задачи полного заполнения полости чистового ручья с рациональным – в пределах мостика – облоем.

В процессе расчётов имеется возможность контролировать форму и размеры заготовки таким образом, чтобы предотвратить образование дефектов в поковке.

Так, расчёт и анализ постадийного формоизменения заготовки для шестерни, полученной (см. рис.4) обращением движения деформирования, даёт возможность проследить за заполнением полости штампа и предотвратить образование зажима на боковой поверхности (рис.7).

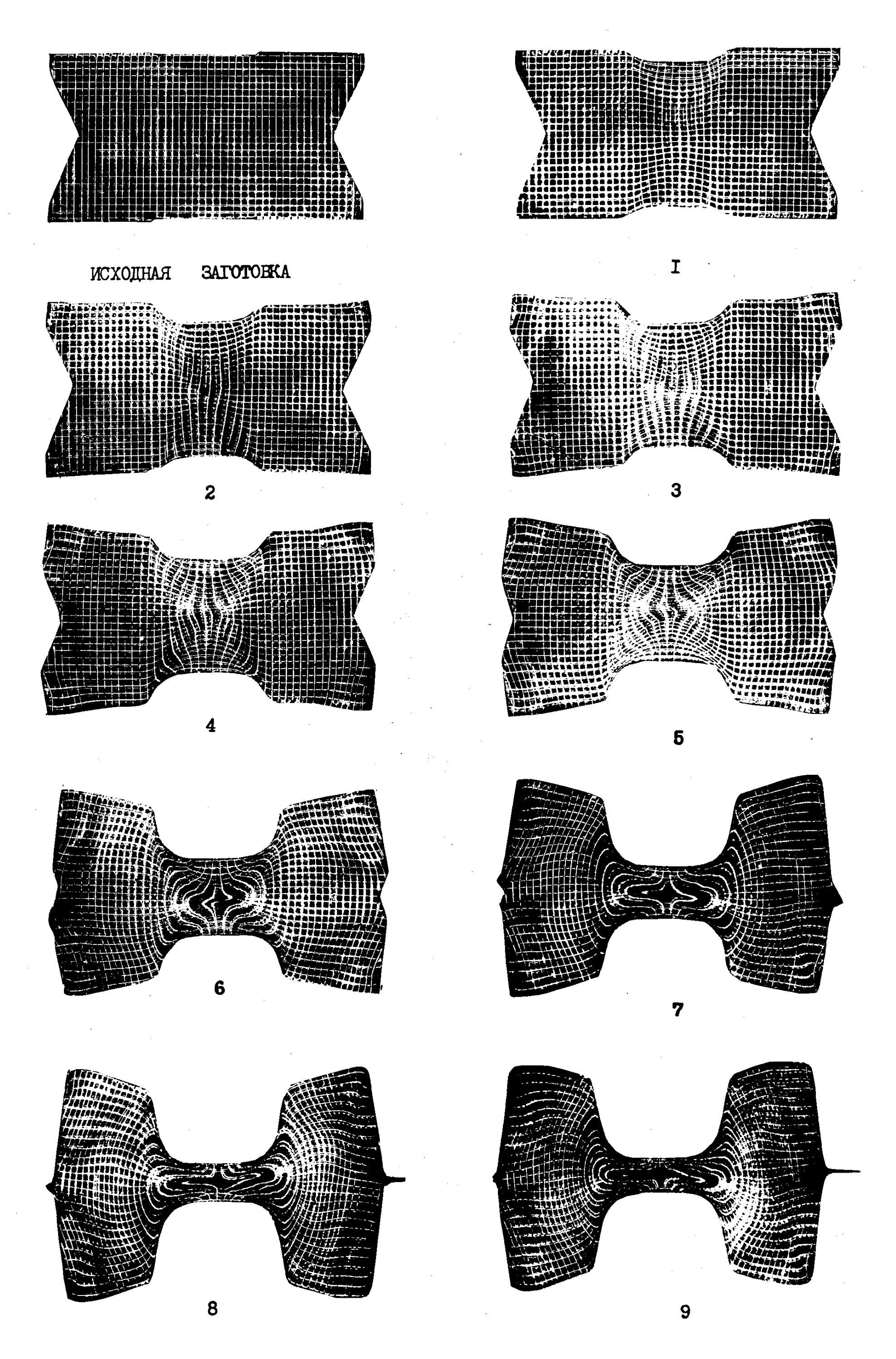


Рис.7. Экспериментально наблюдаемое формоизменение рассчитанной исходной заготовки при постадийном деформировании

Условия предотвращения зажима на боковой поверхности заготовки рассмотрены в работе [56], где показано, что, выполняя расчёт и проектирование в диалоговом режиме, можно получить размеры полуфабрикатов, обеспечивающие изготовление бездефектной поковки.

В последние годы всё чаще ставятся и решаются проблемы прогнозирования и управления распределением деформаций по сечению готовой поковки. Поскольку эти проблемы являются по своей сути оптимизационными, рассмотрим их несколько подробнее.

Оптимизация исходных и промежуточных заготовок в процессах объёмной штамповки. Изготовление поковок с минимально возможной неравномерностью распределения деформации по сечению привлекает внимание исследователей [57-59] в связи с непосредственной зависимостью от этого показателя служебных характеристик готовых изделий. В указанных работах предпринимаются попытки повлиять на те причины появления неоднородностей деформаций в поковках, которые связаны с условиями течения металла в разных микрообъёмах поковок сложной формы. Более полно причины появления неоднородностей деформаций при различных процессах ОМД рассмотрены в учебном пособии [60]. Возможность существенного улучшения качества штампованных изделий путём изменений условий деформирования для поковок ответственного назначения показана, в частности, в работах [61, 62]. Особенностью этих работ является введение заготовительных ручьёв как основного средства управления неравномерностью деформации.

Форма и размеры заготовительных ручьёв определяются на основе многолетних производственных опытов. Одним из принципиальных путей дополнения подобных данных является предложенный в работе [63] подход к оптимизации формы инструмента и полуфабриката в процессах ОМД. Суть подхода состоит в том, что на основе предварительных исследований выдвигается гипотеза о форме оптимизируемых изделий. Далее следует строгая оптимизация по параметрам, которых, как указано в работе [63], должно быть не более 3-4.

Аналогичная методика оптимизации изделий применяется в поисковом конструировании [64], а применительно к заготовительным ручьям для поковок, изготавливаемых ОШ, рассмотрена в работе [57]. Форма заготовительного ручья может быть принята либо на основе соответствующей предварительной информации, либо по данным обратного расчёта. Дальнейшая оптимизация параметров заготовки выполняется безградиентным методом, как это показано в работе [65]. Как показано в работе [57], при таком подходе достигается требуемый эффект: снижается количественно оцениваемая неравномерность распределения деформации по сечению поковки.

Кроме такой методики оптимизации, которая должна рассматриваться как одношаговая, в процессах ОМД нашла применение более строгая как в плане физической, так и в плане математической постановки и реализации методика многошаговой оптимизации, основанная на динами-

ческом программировании. Применительно к оптимизации заготовок и заготовительных ручьёв в процессах ОШ эта методика впервые реализована в работе [66].

Оптимизационные задачи ОМД, в частности ОШ, актуальны и в настоящее время, о чём, в частности, свидетельствуют научные исследования (например, [67]) и включение таких данных в учебники [68] и учебные пособия [69].

Задачи оптимизации структуры поковок, выполненные по схеме многошаговой оптимизации, являются наиболее общими и потому самыми перспективными. Рассмотрим несколько подробнее этот вопрос, следуя работе [70].

Оптимизации подвергался процесс штамповки поковки двутаврового сечения. Оптимизация выполнялась по критерию минимума неравномерности распределения деформации по сечению.

Учитывая результаты работы [57], в качестве целевой функции принят параметр

$$J = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left|\varepsilon_{cp} - \varepsilon_i\right| \cdot S_i}{\sum_{i=1}^{n} S_i}, \tag{2}$$

где ε_i и S_i – степень деформации на произвольном (i-м) участке сечения и площадь этого участка; ε_{cp} – среднее арифметическое значение степени деформации по сечению поковки.

Реализация расчётов направлена на определение таких заготовительных форм полуфабриката, поступающего в чистовой ручей, при которых выражение (2) для рассматриваемого сечения готовой поковки принимает минимальное значение:

$$J \to \min. \tag{3}$$

Управление процессом штамповки в целях достижения условия (2) осуществляется путём увеличения числа степеней свободы течения металла на ряде расчётных стадий. На каждой стадии это обеспечивается наличием зазоров α_n (полостей) между деформируемым металлом и ручьём штампа (например, на стадии n -1), предшествующей расчётной стадии (например, n). Благодаря этому на рассматриваемой расчётной стадии (n -й) создаются условия для заполнения металлом созданной ранее (на стадии n-1) полости, что равносильно увеличению числа направлений (степеней свободы) течения металла.

Оптимизационные расчёты выполнены по схеме обратной прогонки динамического программирования, а расчёты формоизменения на каждой стадии – численным методом граничных элементов.

Вводимые варианты управлений на расчётных шагах определяли различными комбинациями расположения вышеупомянутых зазоров α_n на стадиях расчёта. Значение параметра α_n определяли согласно ГОСТ 7505-89 по допускам на соответствующие размеры поковки с коэффициентом ½.

В целях увеличения точности на каждом расчётном шаге результаты расчётов обратных задач формоизменения контролировались путём решения соответствующих прямых задач. Эти расчёты выполняли методом конечных элементов с использованием программы QForm.

Поскольку реализация решения многошаговой оптимизационной задачи сопряжена со значительным увеличением на каждом следующем шаге расчётной задачи, что определено как «проклятие размерности» [71, с.157], и вызывает необходимость решения большого объёма «пошаговых» задач, возрастающего с увеличением шагов и вариантов управления, вводимых в процессе оптимизации, в работе применена схема введения исходных ограничений по алгоритму «киевский веник», предложенная для решения оптимизационных задач, решаемых методом динамического программирования [72,73]. Реализация этой схемы сводится к определению наиболее конкурентоспособных вариантов перехода форм на соседних шагах оптимизационного расчёта. Полная оптимизационная схема, представленная на рис.8, может быть сокращена до области, ограниченной штриховкой.

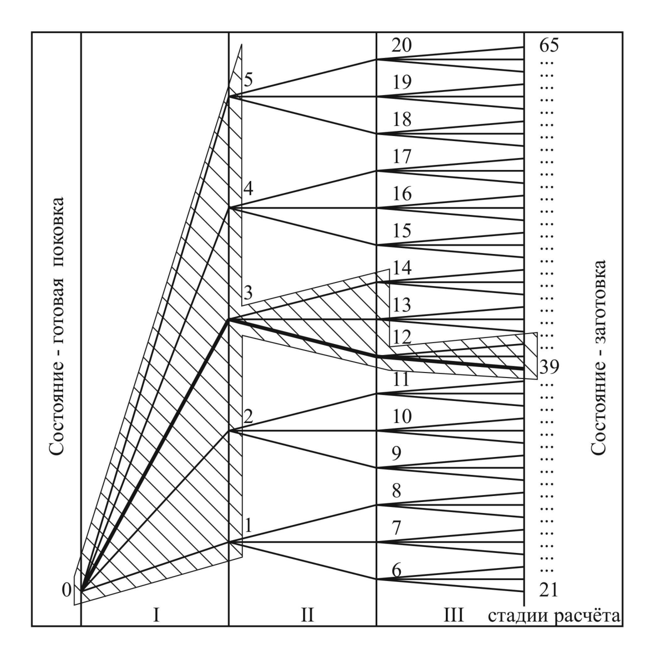


Рис.8. Схема многошаговой оптимизации

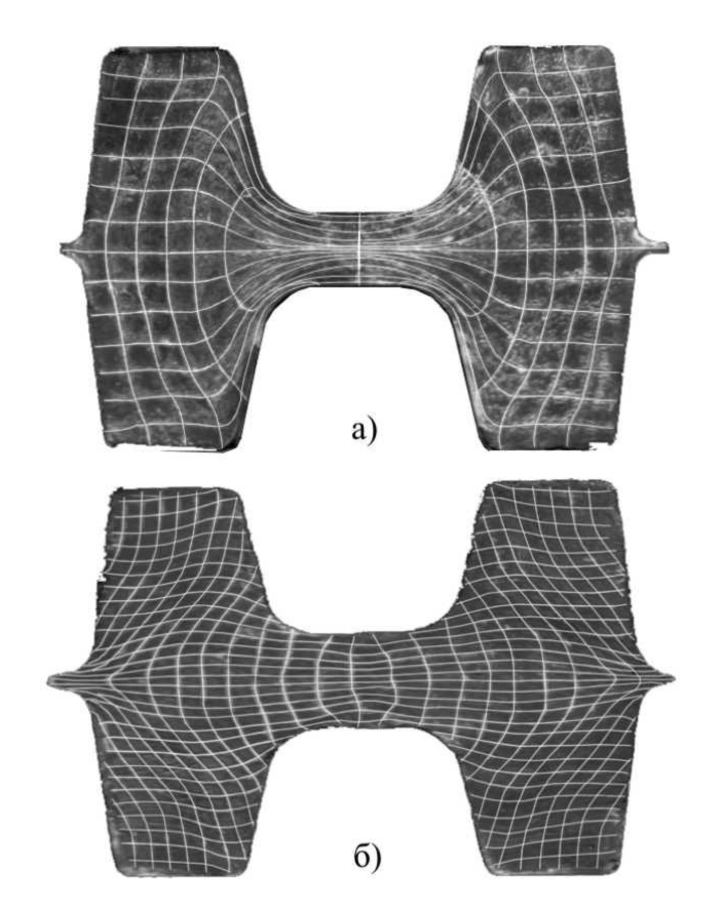


Рис.9. Координатная сетка сечений поковок, полученных штамповкой в один переход (*а*) и штамповкой по оптимальной схеме (*б*)

Экспериментальная апробация выполнена на свинцовых заготовках с координатной сеткой, деформированных с применением специальной оснастки, обеспечивающей условия плоской деформации образцов. Рис.9 наглядно иллюстрирует повышение равномерности распределения деформации по сечению поковки при штамповке по оптимальной схеме. Количественное – расчётное и экспериментальное – сравнение равномерности распределения деформации по параметру (2) в сечении готовой поковки при разных технологических схемах приведено в таблице.

Сравнение оптимальной технологии с известными ТП по критерию J

Технологическая схема штамповки	Расчёт	Эксперимент
Штамповка в один переход (простейшая схема)	0,24	0,16
Штамповка по схеме, приведенной в работе [74]	0,15	0,12
Оптимальная схема штамповки (путь 0-3-12-39, рис. 8)	0,08	0,07

Заключение. Рассмотрены основы методов расчёта и оптимизации процессов объёмной штамповки (ОШ). Показано, что указанные задачи могут быть решены: на основе прямого и обратного математического моделирования, выполняемого современными численными методами; применением методов одно- и многошаговой оптимизации.

В работах авторов основным являлся численный метод граничных элементов. Одношаговая оптимизация процессов ОШ выполнена на основе прямых методов, в первую очередь на основе метода деформируемого многогранника. Многошаговая оптимизация выполнялась на основе алгоритма обратной прогонки метода динамического программирования.

Непременным условием законченности работ является проверка расчётных данных методами физического моделирования.

Библиографический список

1. Тетерин Г.П. Новые методы расчета процессов горячей штамповки. – Волгоград: Н.-Волж. кн. изд., 1969.–112с.
2. Вайсбурд Р.А., Тарновский И.Я., Тетерин Г.П. Об использовании быстродействующих вычислительных машин для разработки технологии горячей штамповки. // Кузнечно-штамповочное производство. – 1963. – №2.–С.10-13.
3. Тетерин Г.П., Полухин П.И. Основы оптимизации и автоматизации проектирования технологических процессов горячей объёмной штамповки. – М.: Машиностроение, 1979.–284с.
4. Теория обработки металлов давлением (Вариационные методы расчёта усилий и деформации) / И.Я. Тарновский, А.А. Поздеев, О.А. Ганаго и др.; Под ред. И.Я. Тарновского – М.: Металлургиздат, 1963.–672с.
5. Аксёнов Л.Б. Системное проектирование процессов штамповки. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1990.–240с.
6. Резников Ю.Н. Течение металла при заполнении полости штампа. // Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия. – 1978. - N4. – С.72-76.
7. C.F.Castro, C.A.C.Antonio and L.C.Sousa. Optimisation of shape and process parameters in metal forging using genetic algorithms. // Journal of Materials Processing Technology, Vol.146, Is.3, 10.03.2004, P.:356-364.
8. Ravikiran Duggirala, Aly Badawy. Finite Element Method Approach to Forging Process Design. // J. Materials Shaping Technology, Vol.6, No.2, 1988, p.: 81-89.
9. Охрименко Я.М. Технология кузнечно-штамповочного производства: Учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 1966.–599с.
10. Математическое моделирование технологических процессов и метод обратных задач в машиностроении. / А.Н. Тихонов, В.Д. Кальнер, В.Б. Гласко. – М.: Машиностроение, 1990.–264с.
11. Резников Ю.Н. Расчет размеров заготовок в процессах объём-

ной штамповки. // Кузнечно-штамповочное производство. – 1979. – №2. – С.14-16.

12. Резников Ю.Н. Расчет формы и размеров заготовок в процессах объёмной штамповки методом верхней оценки. // Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия. – 1979. – №2. – С.64-70.
13. Губкин С.И., Юшков А.В., Добровольский С.И. Выяснение причин расслоения металла (в плоскости облойного мостика) при объемной штамповке. // Сб. науч. трудов ФТИ АН БССР. Вып.2. - Минск: Изд-во АН БССР, 1955. – С.16-22.
14. Бровман М.Я. Использование обратных задач теории пластичности для анализа процесса прокатки. // Технология лёгких сплавов.–1983.–№1.–С.25-31.
15. Моделирование и расчет течения металла при штамповке на КГШП с использованием вычислительного комплекса SPLEN-S / Е.Н.Чумаченко, Л.Э.Рогалевич, М.Б.Свешников, С.Е.Чумаченко // Кузнечно-штамповочное производство. – 2000. – №4. – С.37-42.
16. Биба Н.В., Власов А.В., Лишний А.И., Стебунов С.А. Конечно – элементная модель электровысадки. // Кузнечно-штамповочное производство. – 2001. – №6. – С.40-43.
17. Вовченко А.В. Моделирование формоизменения материала в процессах электровысадки методом граничных элементов (МГЭ)./ ДГТУ. – Ростов н/Д, 1999.-10с.: ил.2, библ.10. - Рус. Деп. в ВИНИТИ 2.12.99, №3577-В99.
18. Forging perform design-ubet based methods. // M.I.Ghobrial, F.H.Osman, A.N.Bramley / Twenty-Fifth International Machine Tool Design and Research Conference, 1985, April 22-24, Birmingham, pp. 466-471.
19. A new apporaach to preform design. in metal forming with the finite element method. // Park J.J., Rebelo Nuno, Kobayashi Shiro. / Int. J. Mach. Tool Des. and Res., 1983, 23, N1, 71-79.
20. Орлов Г.А., Богатов А.А. Вариант решения обратной вариационной задачи в теории обработки металлов давлением. // Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия. – 2001. – №1. – С.: 67-68.
21. Вовченко А.В. Особенности обратного гранично-элементного моделирования процессов объёмной штамповки. // Механика деформируемого твёрдого тела и обработка металлов давлением: Сб. науч. тр. Часть 1. / ТулГУ. Тула, 2002. - С.70-76.
22. Резников Ю.Н., Вовченко А.В. Особенности расчётов процессов объёмной штамповки, основанных на решении обратных задач. // Вестник ДГТУ. – 2003. – Т.3. – №4(18). - С. 430–437.

23. Друянов Б.А., Непершин Р.И. Теория технологической пластичности. – М.: Машиностроение, 1990.–272с.
24. Томлёнов А.Д. Теория пластического деформирования металлов. – М.: Металлургия, 1972.–408с.
25. Джонсон У., Меллор П.Б. Теория пластичности для инженеров. – М.: Машиностроение, 1979.–567с.

26. Баев Б.А., Костарев И.В. Использование положений теории течения тонкого пластического слоя при горячей штамповке ребристых деталей для проектирования технологических процессов. // Технология лёгких сплавов. – 1979. – №7. – С.47-50.
27. Костарев И.В., Казьмин А.В. Исследование процесса формообразования деталей с одно- и двухсторонними рёбрами жёсткости. // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 1980. – №1. – С.106-109.
28. Ильюшин А.А. Вопросы течения пластического вещества по поверхностям. // Прикладная математика и механика. – 1954. – Т.18. – Вып.3.– С.265-288.
29. Прогнозирование и способ устранения образования зажимов при формовке колёсных заготовок. / Б.Г. Каплунов, В.Н. Крашевич, М.И. Староселецкий, А.В. Белущенко // Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия. – 1991. – №1. – С. 55-56.
30. Каплунов Б.Г. Математическая модель расчёта пластической деформации в процессах штамповки заготовок тел вращения. // Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия. – 1994. – №2. – С.20-25.
31. Математическое моделирование процесса получения непрерывно-литой деформированной заготовки на литейно-ковочном модуле. / В.И. Одиноков, Б.И. Проскуряков, В.В. Черномас // Металлы. – 2006. – №1. – С.25-29.
32. Гугучкин Ю.В., Стебунов С.А., Шакуров Л.А. Опыт применения системы ФОРМ-2Д в производственной практике. // Кузнечно-штамповочное производство. – 1993. – №10. – С.24-26.
33. Автоматизированная система Форм-2Д для расчёта формоизменения в процессе штамповки на основе метода конечных элементов. / Г.Я.Гун, Н.В.Биба, О.Б.Садыхов и др. // Кузнечно-штамповочное производство. – 1992. – №9-10. – С.4-7.
34. Вайо П., Сарычев Н.Г., Чинак П. Анализ процесса выбора переходов штамповки поковок с помощью компьютерного моделирования. // Кузнечно-штамповочное производство. – 1998. – №5. – С.29-31.
35. Проектирование технологических процессов объёмной

штамповки и расчёт элементов штампового инструмента, оснастки и оборудования на базе вычислительного комплекса SPLEN. / Е.Н. Чумаченко, М.А. Цепин, С.Е. Чумаченко, Л.Э. Рогалевич // Вестник машиностроения.–2000.–№4.–С. 37-45.

36. Миленин А.А. Сравнительный анализ возможностей метода граничных элементов и метода конечных элементов при математическом моделировании процессов обработки металлов давлением. // Металлы.–1997.–№2.–С.65-72.
37. Резников Ю.Н., Вовченко А.В. О применении метода граничных элементов в математическом моделировании нестационарных процессов деформации. // Металлы. – 2002. – №6. – С.49–54.
38. Секулович М. Метод конечных элементов. – М.: Стройиздат, 1993.–664с.
39. Мелош Р. Основы получения матриц для прямого метода жёсткостей. // Ракетная техника и космонавтика. – 1963. – №7. – С.169-176.
40. Чер Л., Зиая Д., Леринц Л.Пакет программ для имитации заполнения ручья при комбинированном выдавливании в холодном и горячем состоянии. // Кузнечно-штамповочное производство. – 1987. – №9. – С.9-11.
41. Бенерджи П., Баттерфилд Р. Метод граничных элементов в прикладных науках.–М.: Мир, 1984.–494с.
42. Бреббия К. и др. Методы граничных элементов. / Бреббия К., Теллес Ж., Вроубел Л. – М.: Мир, 1987.–524с.
43. Бреббия К., Уокер С. Применение метода граничных элементов в технике. – М.: Мир, 1982.–248с.
44. Теллес Д.К.Ф. Применение метода граничных элементов для решения неупругих задач. – М.: Стройиздат, 1987.–160с.
45. Ворович И.И., Красовский Ю.П. О методе упругих решений. // Доклады АН СССР. – 1959. – Т.126. – №4. – С.740-743.
46. Определение параметров напряженно-деформированного состояния цилиндрического образца при осадке плоскими плитами / П.И.Полухин, В.П.Полухин, Н.Ф.Андрианов, А.В.Новиков // Технология лёгких сплавов. – 1982. – №3. – С.23-28.
47. Применение метода граничных интегральных уравнений к исследованию процессов обработки металлов давлением / П.И.Полухин, В.П.Полухин, Н.Ф.Андрианов, А.В.Новиков // Изв.АНСССР.Металлы.-1982.-№1.-С.179-183.
48. Лиховцев В.М., Перлин П.И. Решение упругопластических задач методами потенциала. // Прикладные проблемы прочности и пластичности: Всесоюзный межвуз. сб. – Вып.34. – Горький. – 1986. – С.26-32.
49. Сведлоу Дж., Круз Т. Вывод граничных интегральных уравнений

для трёхмерного упругопластического течения. // Механика: Периодический сборник переводов. – 1972. – №4 (134). – С.96-106.
50. Ильин В.П. Численные методы решения задач электрофизики. – М.: Наука, 1985.–336с.
51. Cheng-I Weng, Chuen-Chang Hung. Elasto-plastic deformation of upsetting. / Proceedings of the International Conference held in Barcelona, Spain, 6 th - 10 th, April, 1987, pp.1097-1108.
52. A.Chandra, S.Mukherjee. A Boundary Element Analysis of Metal Extrusion Processes. // Journal of Applied Mechanics. June 1987, Vol.54, pp. 335-340.
53. A.Chandra, S.Saigal. A Boundary Element Analysis of the Axisymmetric Extrusion Processes. // Int. J. Non-Linear Mechanics. 1991, Vol.26, No1, pp. 1-13.

54. Костарев Н.В., Харитонов А.О. Прочностной расчёт штамповочной оснастки с применением методов граничных элементов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1993. – №12. – С.13-15.
55. Резников Ю.Н., Вовченко А.В., Быкодоров А.В. Уменьшение длительности стадии доштамповки на основе моделирования формоизменения. // Кузнечно-штамповочное производство. ОМД. – 2001. – №4. – С.33–36.
56. Резников Ю.Н., Курочкин Г.М. Расчёт и проектирование заготовок в процессах объёмной штамповки с применением ЭВМ и чертёжно-графического автомата. // Кузнечно-штамповочное производство. – 1980. – №1. – С.14-16.
57. Резников Ю.Н., Калинин Г.Г. Оптимизация заготовительных ручьёв для поковок, изготовляемых объёмной штамповкой. // Кузнечно-штамповочное производство. – 1998. – №10. – С.8-10.
58. Prediction of Grain Size Evolution for Hot-Forget Workpieces. // Li Jun, Li Runfang /Cailiao Kexue yu gongyi: Mater.Sci.&Technol.-1999,Vol.7, No2, pp.73-76.
59. M. Becker & R. Kopp A new approach to optimization of metal forming processes / Institute for Metal Forming. Technical University of Aachen, FR Germany; Numiform 1989, Tompson et. al. (eds), Balkema, Rotterdam, pp.:107-113.
60. Полухин П.И., Горелик С.С., Воронцов В.К. Физические основы пластической деформации. – М.: Металлургия, 1982.–584с.
61. Шайкевич Е.Б., Медницкий В.М. Влияние условий деформирования на качество штампованных полуфабрикатов из алюминиевых сплавов. // Технология лёгких сплавов. – №2. – 1981. – С.56-59.

62. А.с. 461783 СССР, МКИ В 21 k 3/04; В 21 j 13/02. Штамп для предварительного формообразования заготовок турбинных лопаток / В.И.Тихонов, Е.Н.Пересниченко, И.Г.Генерсон, И.Д.Бурмистров, И.П.Петров, Ю.Я.Рысков // Опубл. в Б.И. №8, 28.02.75.–2с.
63. Трусов П.В. Оптимизация процессов профилирования труб сложной конфигурации. // Прикладные проблемы прочности и пластичности. – Вып.20. – 1982. – С.70-77.
64. Автоматизация поискового конструирования (Искусственный интеллект в машинном проектировании). / А.И.Половинкин, Н.К.Бобков, Г.Я.Буш и др. – М.: Радио и связь, 1981.–344с.
65. Резников Ю.Н. О расчете течения металла в процессах объемной штамповки методом верхней оценки. // Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия. – 1981. – №4. – С. 84-87.
66. Резников Ю.Н. Расчёт оптимальных заготовок и заготовительных ручьёв в процессах объёмной штамповки // Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия. – 1987. – №10. – С. 39-43.
67. Вайсбурд Р.А., Коновалов А.В. Задачи оптимального управления процессами обработки металлов давлением // Кузнечно-штамповочное производство. – №8. – 1998. – С.10-16.
68. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением: Учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1986.–688с.
69. Резников Ю.Н., Мороз Б.С., Вовченко А.В. Оптимизация технологических процессов обработки металлов давлением: Учеб. пособие. – Ростов-н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2002.–94с.
70. Резников Ю.Н., Вовченко А.В., Жиленков В.Е.Об оптимизации процессов деформирования металлов. // Металлы.–2006.–№1.–С. 39–43.
71. Габасов Р., Кириллова Ф.М. Основы динамического программирования. – Минск: Изд-во БГУ, 1975.–264с.
72. Моисеев Н.Н. Численные методы в теории оптимальных систем. – М.: Наука, 1971.–424с.
73. Михалевич В.С. Последовательные алгоритмы оптимизации и их применение. // Кибернетика. – 1965. – №1,2.
74. Неймайер Н.Ф. Холодная и горячая штамповка. Т2. – М.: ОНТИ, 1935.–744с.

Материал поступил в редакцию 21.11.06.

Yu.N. REZNIKOV, A.V. VOVCHENKO

CALCULATION AND OPTIMIZATION OF DIE FORGING PROCESSES.

The review of methods of calculation and optimization of die forging processes is submitted. The scheme of direct and inverse mathematical simulation of metal forming and methods realization of calculation are considered. On concrete examples the principles and methods of the calculation of optimum original and intermediate blanks for forgings being produced by die forging processes are shown.

РЕЗНИКОВ Юлий Наумович (р.1934), доктор технических наук (1992), профессор кафедры МиТОМД ДГТУ (1993). Окончил Днепропетровский металлургический институт (1957) по специальности «Обработка металлов давлением».
Научные интересы связаны с совершенствованием расчётов и оптимизации процессов ОМД на основе метода граничных элементов и решения обратных задач формоизменения.
Автор 108 научных работ по представленному направлению. Среди учеников два кандидата технических наук.

ВОВЧЕНКО Арменак Владимирович (р.1974), кандидат технических наук (2000), доцент кафедры МиТОМД ДГТУ (2004). Окончил ДГТУ (1996) по специальности «Автоматизация технологических процессов и производств».
Автор 24 научных публикаций по совершенствованию расчётов и моделированию процессов ОМД (ОШ) численным методом граничных элементов.